Québec

Note de recherche forestière n° 120

Nouvelles technologies de production de plants forestiers au Québec et leur intégration dans les programmes de reboisement des pays en voie de développement

Mohammed S. LAMHAMEDI et Jean GAGNON

F.D.C. 232.3:047.3:(714)
L.C. SD 408

Résumé

Afin de diminuer la pression sur les forêts naturelles et de satisfaire les besoins en produits ligneux, de lutter contre l'érosion des sols et la désertification, le reboisement figure parmi les stratégies adoptées en vue d'un développement durable. L'utilisation de plants de qualité permettra d'améliorer la survie, l'établissement et la croissance des plants, ce qui aura pour effet de garantir un meilleur succès des plantations forestières. De plus, la production de plants de qualité repose sur une gestion optimale de l'irrigation et de la fertilisation en pépinière forestière. Ces techniques culturales consomment beaucoup d'eau et favorisent le lessivage des éléments minéraux, ce qui affecte la qualité des eaux souterraines et de surface. L'utilisation rationnelle de l'eau et la préservation de sa qualité sont devenues un enjeu planétaire en matière de développement socio-économique. Pour produire des plants de qualité en pépinière forestière tout en minimisant l'impact environnemental des fertilisations, nous avons développé de nouvelles technologies reliées à l'irrigation et à la fertilisation des plants.

Cet article présente les dernières percées technologiques, uniques au monde et facilement utilisables en pépinière, notamment : la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT), pour contrôler et optimiser l'irrigation, le logiciel de fertilisation *PLANTEC* et le logiciel *LessN*, un outil de simulation de la minéralisation de la matière organique et du lessivage des nitrates et des pesticides. Ces technologies ont été intégrées à différents degrés dans plusieurs pays (Chine, Tunisie, Maroc, France, Nicaragua, Guatemala et Bolivie), afin de leur permettre de réduire l'utilisation de l'eau, de protéger sa qualité et de produire des plants de qualité. L'utilisation de ces plants de qualité a permis d'améliorer de façon significative le taux de survie dans les sites de reboisement.

Mots clés : pépinière, optimisation, irrigation, fertilisation, lessivage, minéralisation, logiciel, *PLANTEC*, *LessN*, reboisement.

Abstract

Reforestation is among the strategies being adopted to reduce pressure on natural forests while meeting the needs for timber products and combating soil erosion and desertification. The use of quality forest tree seedlings results in better survival, establishment and growth and effectively guarantees more successful forestry plantations. To produce quality seedlings, forest tree nursery irrigation and fertilization management must be optimised. These cultural techniques use a high volume of water and therefore promote the leaching of mineral nutrients, which in turn affects the quality of both surface and groundwaters. The rational use of water and the preservation of water quality have become global issues for socio-economic development. New technologies have been developed for crop irrigation and fertilization to ensure that quality nursery seedlings are produced while minimizing the environmental impact of fertilization.

This article presents the most recent technological breakthroughs, which are not only unique in the world, but can also be easily incorporated into forest nursery practice. They are, notably: time domain reflectometery (TDR), which is used to control and optimize irrigation; PLANTEC fertilization software, and LessN software, a tool which simulates mineralization of the organic matter and leaching of nitrates and pesticides. These technologies have been integrated at varying degrees in several countries (China, Tunisia, Morocco, France, Nicaragua, Guatemala and Bolivia) to help reduce water use and protect water quality during seedling production. The use of quality seedlings has significantly improved survival rates on reforestation sites.

Keywords : *Nursery, optimization, irrigation, fertilization, leaching, mineralization, software,* PLANTEC, LessN, *reforestation.*

Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec) G1P 3W8 Canada

Téléphone : (418) 643-7994
Télécopieur : (418) 643-2165
Courriel : recherche.forestiere@mrnfp.gouv.qc.ca

Ce texte est la version intégrale du mémoire présenté par les auteurs au XII^{e} Congrès forestier mondial de septembre 2003 à Québec, Canada.

Les versions française et anglaise du mémoire original sont aussi disponibles en format PDF à l'adresse suivante :

Original text in english is also available in PDF form on web site :

http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/alias/cfm2003.html

104-02191/

Introduction

L'utilisation de plants de qualité dans les programmes de reboisement a un impact majeur sur l'établissement, la physiologie, la survie et la croissance des plantations forestières (MARGOLIS et BRAND 1990). Des conditions optimales de croissance permettent de déclencher le fonctionnement de gènes chez les plants forestiers qui, autrement, n'interviendraient qu'à un stade plus âgé en conditions naturelles (LASCOUX *et al.* 1993). À ce chapitre, l'irrigation et la fertilisation figurent parmi les techniques culturales qui affectent la qualité des plants. Ils sont difficiles à optimiser en pépinière forestière. L'utilisation non raisonnée de l'eau, des fertilisants et des pesticides menace sérieusement la qualité des eaux de surface et souterraines (PEPPER *et al.* 1996). Cependant, la rareté et la détérioration de la qualité des ressources hydriques à l'échelle mondiale sont devenues un obstacle majeur à la sécurité alimentaire et au développement socio-économique.

Pour préserver la qualité des eaux souterraines, les règlements sur l'eau potable adoptés pour l'azote en Amérique du Nord et en Europe prévoient que les concentrations en azote (N) sous formes de nitrates et nitrites ne doivent pas dépasser respectivement 10 et 11,4 mg N/L. Bien que les cultures des pépinières forestières et horticoles occupent des superficies beaucoup moins importantes que celles des milieux agricoles, les techniques de gestion de l'irrigation et de fertilisation pratiquées dans ces pépinières demeurent très consommatrices d'eau et favorisent le lessivage des éléments minéraux, notamment celui des nitrates (JUNTUNEN et RIKALA 2001, LAMHAMEDI *et al.* 2001). Actuellement, le lessivage et la contamination de la nappe phréatique par les NO_3^- constituent un problème planétaire (PEPPER *et al.* 1996).

Au cours des dernières années, une approche originale de nutrition minérale informatisée a été développée au Québec. Elle consiste à fertiliser les plants de façon à combler les besoins nutritifs hebdomadaires (LANGLOIS et GAGNON 1993, GIRARD *et al.* 2001). De plus, cette approche de nutrition minérale facilite la production de plants en pépinière en vue de répondre aux normes très strictes de qualité morphologique et physiologique et de réduire l'impact environnemental des fertilisations. Depuis 1992, les pépiniéristes du Québec utilisent cette approche sur une base opérationnelle grâce au logiciel *PLANTEC* (GIRARD *et al.* 2001). Un autre logiciel, *LessN*, a aussi été développé pour simuler en pépinière forestière la minéralisation de la matière organique, le lessivage de l'azote et des pesticides sous les plants à racines nues (BANTON et LAROCQUE 2002, LAROCQUE *et al.* 2002). Récemment, d'autres travaux (LAMHAMEDI *et al.* 2001) ont permis d'adapter un outil pratique de contrôle et d'optimisation de l'irrigation en pépinière (*MP-917*), dont le principe repose sur la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT). Cette technique facilite la prise de décision en matière d'irrigation tout en tenant compte de la teneur en eau du substrat réellement disponible au niveau des racines.

Pour assurer une production des plants forestiers davantage respectueuse de l'environnement, il paraît judicieux de gérer l'irrigation et la fertilisation en tenant compte de la teneur en eau du substrat (%, v/v), de sa fertilité, des besoins en eau et en éléments minéraux du plant, des apports d'azote minéral provenant de la minéralisation de la matière organique du sol, des précipitations, des variables environnementales et des systèmes d'irrigation et de fertilisation. Cette optimisation des régies de culture nécessite un couplage simultané de ces percées technologiques. Pour faire bénéficier les programmes de reboisement des pays en voie de développement de ces technologies de pointe, le défi consiste à les introduire de façon progressive et à les adapter dans le cadre des projets de modernisation des pépinières forestières.

Cette étude vise à présenter les percées technologiques développées au Québec. Ces technologies sont actuellement utilisées à l'échelle opérationnelle en pépinière forestière et ont permis d'optimiser l'irrigation et la fertilisation des plants. Elles consistent à : 1) utiliser la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT) pour contrôler et optimiser l'irrigation des plants (1 + 0) et (2 + 0) tout en minimisant le lessivage 2) gérer la fertilisation des plants forestiers en fonction de leurs besoins nutritifs et de leurs stades de croissance à l'aide du logiciel *PLANTEC* 3) coupler le logiciel *LessN*, outil de simulation de la minéralisation de la matière organique et du lessivage de l'azote et des pesticides, avec la RDT et le logiciel *PLANTEC*, et 4) adapter et appliquer ces outils technologiques dans certaines pépinières modernes des pays en voie de développement, afin de produire des plants de qualité pour le reboisement.

Matériel et méthodes

Contrôle et optimisation de l'irrigation des semis (1 + 0) produits en pépinière forestière

Des dispositifs expérimentaux ont été installés dans les conditions opérationnelles des pépinières forestières avec les deux essences les plus utilisées au Québec : l'épinette noire (1 + 0) (*Picea mariana* [Mill] BSP) et l'épinette blanche (1 + 0) [*Picea glauca* (Moench.) Voss]. L'ensemencement a été réalisé dans des conteneurs à parois ajourées IPL *25-350A* (25 cavités de 350 cm^3), dont les cavités sont remplies d'un mélange de tourbe et de vermiculite (3/1, v/v). Pour ces deux essences, nous avons installé un dispositif en six blocs aléatoires complets sous tunnel en vue de déterminer l'effet de quatre régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %; % cm^3 H_2O/cm^3 substrat), maintenues constantes tout au long de la saison, sur la croissance, les échanges gazeux, l'architecture des racines et le lessivage des éléments nutritifs. Pour chaque régie d'irrigation, 162 conteneurs (27 récipients / bloc / régie) sont utilisés pour les six blocs du dispositif expérimental. Chaque régie d'irrigation est distribuée aléatoirement à l'intérieur de chaque bloc.

Par ailleurs, les teneurs en eau ont été contrôlées par RDT en utilisant le MP-917 (ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, C-B, Canada). Les procédures de contrôle et d'ajustement des régies d'irrigation et de la fertilité du substrat, d'insertion des sondes dans les conteneurs sont décrites par LAMHAMEDI *et al.* (2000, 2001, 2002a). Ces travaux présentent les méthodes d'échantillonnage, d'analyse de la croissance, d'évaluation des échanges gazeux, de l'architecture des racines et de la nutrition minérale.

Gestion informatisée de la nutrition des plants en relation avec l'irrigation et le lessivage

La gestion informatisée de la fertilisation à l'aide du logiciel *PLANTEC* (GIRARD *et al.* 2001) permet aux pépiniéristes de modéliser la croissance saisonnière des plants forestiers, quel que soit le type de culture (essence, âge, plant en conteneur ou à racines nues), d'évaluer ses besoins hebdomadaires en éléments minéraux (N, P, K) et de construire un calendrier de fertilisation spécifique à chaque essence. Une fois que les données des suivis de cultures (croissance des plants, teneurs en minéraux dans les plants et les substrats ou sols) ont été saisies dans *PLANTEC*, le logiciel élabore des courbes d'évolution saisonnière de trois paramètres : masses sèches totales du plant, concentrations en éléments minéraux dans le plant entier et dans le substrat. Toutes les étapes de construction d'un calendrier de fertilisations sont décrites dans LANGLOIS et GAGNON (1993) et GIRARD *et al.* (2001).

Évaluation du lessivage des éléments minéraux sous les cultures 1 + 0 et 2 + 0 en conteneurs

Pour les deux dispositifs d'épinettes blanches et noires (1 + 0) produits sous tunnel (mai à octobre) dans le conteneur *25-350A*, à chaque date d'échantillonnage, le lessivage des éléments minéraux a été déterminé en analysant la solution lessivée en fonction des quatre régies d'irrigation. Pour chaque conteneur échantillonné, la solution lessivée à partir des 25 cavités du conteneur a été prélevée dans un récipient-capteur (RC) en plastique muni à sa base d'une bouteille.

Dans le cas de la culture extérieure d'épinette blanche (2 + 0) en conteneur *25-350A*, le suivi du lessivage a été réalisé de façon continue tout au long de la saison (mai à octobre) dans un dispositif en quatre blocs aléatoires. Dans chaque bloc, nous avons installé cinq RC pour collecter le volume lessivé, soit un total de 20 RC. Alors que des tensiomètres ont permis de mesurer les apports d'eau (précipitations, irrigations), l'évolution saisonnière des teneurs en eau du substrat (%, v/v) a été mesurée grâce au MP-917. Les variables environnementales ont été enregistrées à l'aide d'une station météorologique dotée d'un système d'acquisition de données.

Utilisation du logiciel *LessN* pour simuler la minéralisation de la matière organique et le lessivage de l'azote sous les plants à racines nues

Le logiciel *LessN* a été utilisé pour quantifier les apports d'azote minéral (N_{min}) qui proviennent de la minéralisation de la matière organique du sol et pour simuler le lessivage des nitrates (NO_3) sous les plants à racines nues. Une interface a été développée entre l'outil de simulation *LessN* et le logiciel de fertilisation *PLANTEC* pour permettre aux pépiniéristes de gérer la fertilisation azotée des plants à racines nues en tenant compte des apports de N_{min} issus de la minéralisation de l'azote organique. Un total de 19 cases lysimétriques a aussi été installé en pépinière, afin de mesurer les quantités d'azote et autres minéraux lessivés sous les plants à racines nues.

Résultats et discussion

Contrôle et optimisation de l'irrigation en relation avec la qualité des plants

La RDT a permis de maintenir tout au long de la saison les quatre teneurs en eau du substrat (%, v/v) au niveau de la rhizosphère des épinettes blanches et noires (1 + 0) avec une erreur standard qui dépasse rarement 2 % (Figure 1). En modifiant uniquement la longueur de la sonde, le nombre de cavités échantillonnées pourra être ajusté pour tous les types de conteneurs utilisés en pépinière à l'échelle mondiale. La simplicité et le caractère instantané de la RDT en matière de détermination des teneurs en eau du substrat et de prise de décision sur la régie d'irrigation font qu'elle est devenue une technique très utilisée par plusieurs pépinières forestières et horticoles (LAMHAMEDI *et al.* 2002b).

Durant la première saison de croissance, le maintien des quatre régies d'irrigation ciblées a eu un effet significatif sur les variables standards de croissance des semis d'épinette noire ($P = 0{,}0261$ à $P < 0{,}0001$) et d'épinette blanche ($P < 0{,}0001$). De plus, la régie d'irrigation a affecté significativement les concentrations et le contenu en éléments minéraux des semis ainsi que le lessivage, l'architecture des racines et les échanges gazeux. Ces résultats corroborent ceux de plusieurs travaux (LAMHAMEDI *et al.* 2001, STOWE *et al.* 2001), qui montrent que la réduction de l'irrigation améliore la croissance et la physiologie des semis.

Par ailleurs, les quantités d'eau cumulatives utilisées durant la saison de croissance des semis d'épinette noire (1 + 0) ont atteint 60, 69, 95 et 253 mm pour maintenir respectivement les quatre régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 % (v/v). De plus, les comparaisons entre les régies d'irrigation révèlent que les semis d'épinette noire (1 + 0) peuvent croître sous une régie d'irrigation de 15 % sans affecter les variables morphologiques et physiologiques.

Gestion informatisée de la fertilisation des plants forestiers en pépinière forestière

Grâce au logiciel *PLANTEC*, l'approche de nutrition minérale informatisée a permis de mieux gérer et d'optimiser les apports de fertilisants en fonction des besoins nutritifs hebdomadaires des plants et de leurs stades de croissance. Ce logiciel peut gérer simultanément jusqu'à 500 lots et 100 calendriers de fertilisation. De plus, *PLANTEC* peut également assurer le suivi des données météorologiques, des irrigations et des pulvérisations de pesticides, de même que la gestion des intrants de la pépinière. Par rapport aux outils informatiques disponibles, *PLANTEC* s'avère être le plus complet, car il prend en compte plusieurs aspects de la fertilisation.

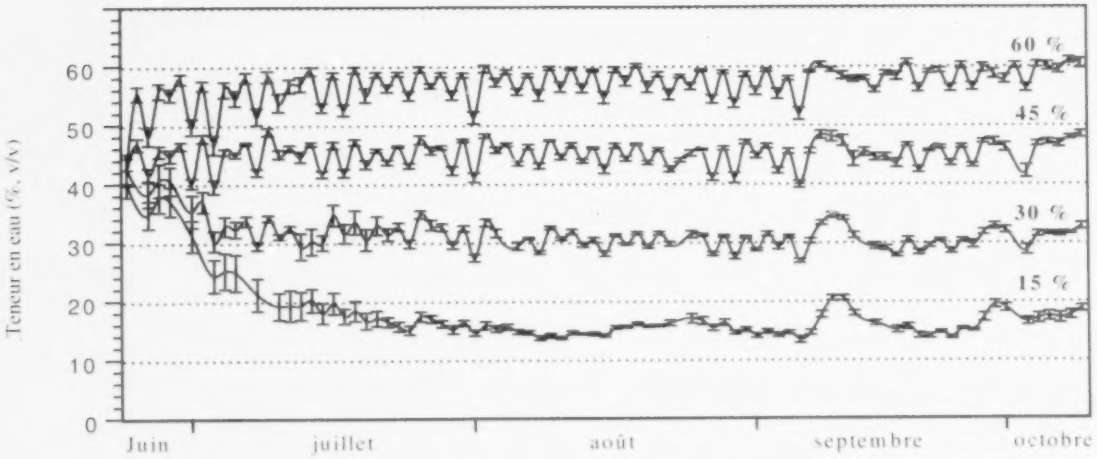

Figure 1. Exemple de contrôle très précis des quatre teneurs en eau (%, v/v) dans le substrat, à l'aide de la RDT.

Évaluation du lessivage des minéraux sous les cultures 1 + 0 et 2 + 0 produites en conteneurs

Le lessivage de la solution du sol en fonction des quatre régies d'irrigation évaluées s'ajuste à une fonction exponentielle [$L = 0{,}1554e^{7{,}103x}, R^2 = 0{,}67$ où L = quantité lessivée en mL/cavité et x = régie d'irrigation] sous les plants d'épinette noire (1 + 0) et d'épinette blanche (1 + 0) produits sous tunnel. La régie d'irrigation 60 % avait aussi causé un lessivage important des éléments minéraux sous le conteneur *25-350A*.

Dans le cas de la culture extérieure d'épinette blanche 2 + 0 produite en conteneur *25-350A*, les apports d'eau totalisaient 872 mm, dont 374 mm sont d'origine pluviale (Figure 2). Ces 872 mm d'eau équivalent à un apport de 114,7 litres (L) par conteneur, alors que les pertes d'eau s'élevaient à 47 L/conteneur, soit 41 % des apports d'eau.

Cette perte d'eau est du même ordre de grandeur que celle obtenue pour une culture semblable (51 L/conteneur) par GAGNON et GIRARD (2001). Le suivi continu des teneurs en eau au niveau de la rhizosphère a montré que celles-ci ont varié de 37 à 69 %, avec une moyenne saisonnière de 53 % (v/v). Les pépiniéristes devraient gérer l'irrigation des cultures 2 + 0 en conteneurs, de façon à ce que les teneurs en eau se situent autour de 35-40 % (v/v) et qu'elles ne dépassent jamais 50 %.

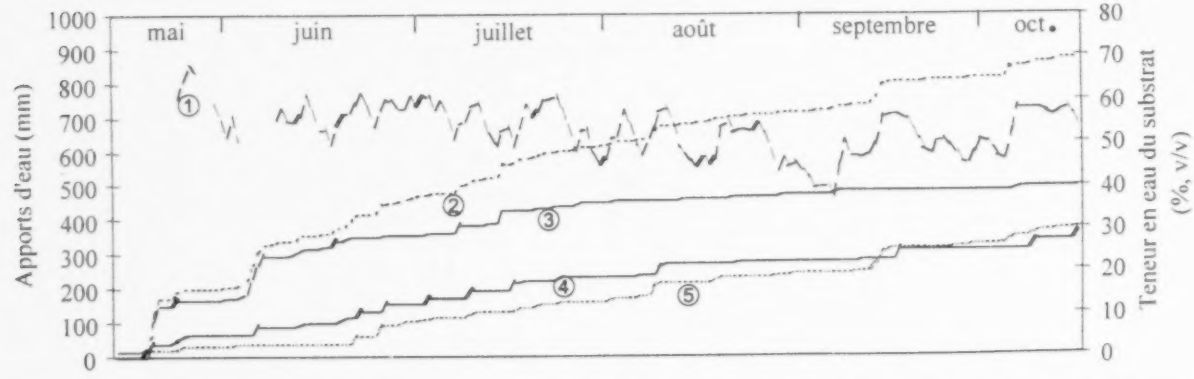

Figure 2. Évolution saisonnière : ① teneurs en eau (%, v/v) du substrat, ② apports d'eau cumulatifs, ③ irrigations cumulatives, ④ pertes d'eau cumulatives et ⑤ pluies cumulatives.

Cette perte saisonnière d'eau (47 L/conteneur) a été accompagnée par un lessivage important des anions (NO_3^-, $H_2PO_4^-$) et des cations (NH_4^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}). Les résultats montrent que l'ion NO_3^- n'est pas le seul élément nutritif, ni la seule source d'azote à avoir été lessivée au cours de la saison (Figure 3). Sur les 311 kg N/ha que les plants ont reçu entre le 19 mai et le 18 octobre, il s'en est lessivé 183 kg N/ha (59 %). Cette perte d'azote était constituée aux 2/3 en nitrate et au 1/3 en ammonium. Afin de diminuer ces pertes, il est essentiel de maintenir dans le substrat des teneurs en azote minéral (N_{min}) entre 200 et 250 mg/kg (ppm) durant la phase de croissance active des plants et de ne pas dépasser 250 mg/kg. En réduisant le lessivage des NO_3^- et celui des cations qui les accompagnent, cela permettra de réduire substantiellement les risques de contamination des eaux souterraines.

Simulation de la minéralisation de la matière organique et du lessivage sous les plants à racines nues à l'aide de *LessN*

LessN est à notre connaissance le seul logiciel conçu pour quantifier le devenir de l'azote et des pesticides en pépinière forestière. Ce logiciel permet aussi de simuler (kg N/ha/année) la minéralisation de la matière organique du sol. Grâce à *LessN*, le pépiniériste peut maintenant connaître les apports d'azote minéral (N_{min}) qui proviennent de la minéralisation de l'azote organique et déduire ces apports de N_{min} des doses d'azote qu'il avait prévu appliquer aux plants. Ainsi, *LessN* contribue à réduire « à la source » les quantités de nitrates susceptibles d'être lessivées jusqu'à la nappe phréatique.

Des simulations réalisées par LAROCQUE *et al.* (2002) avec une culture d'épinette noire 2 + 2 ont fait ressortir que sous les conditions climatiques du Québec, plus de 90 % du lessivage annuel des nitrates survient au printemps (fonte des neiges) et à l'automne (pluies). En effet, 75 % de ces pertes avaient eu lieu au printemps. Les simulations des données de ces dispositifs avec *LessN* nous ont permis de quantifier la minéralisation de la matière organique en pépinières forestières et de montrer qu'elle a varié entre 50 et 80 kg N/ha par année.

Intégration des nouvelles approches de production de plants dans les programmes de reboisement de plusieurs pays

La mise en application et l'intégration progressive de ces technologies dans les programmes de reboisement de plusieurs pays [Tunisie, Maroc et Nicaragua (LAMHAMEDI *et al.* 2000), Chine (Langlois, C.G., comm. pers.), France, Bolivie et Guatemala] ont été effectuées dans le cadre de projets de coopération en réseau et/ou des projets de modernisation des pépinières forestières. De plus, plusieurs ajustements ont été réalisés à propos de la gestion des pépinières, notamment l'informatisation des pépinières, le choix des conteneurs, le compostage des déchets sylvicoles et la mycorhization (LAMHAMEDI *et al.* 2000). Ces nouvelles techniques ont permis d'améliorer significativement la qualité des plants et leur taux de survie.

Conclusion

L'utilisation de la RDT en pépinière forestière permet de gérer l'irrigation en fonction des besoins des plants. Grâce aux logiciels de fertilisation *PLANTEC* et de simulation de la minéralisation et du lessivage de l'azote (*LessN*) développés au Québec, les pépiniéristes peuvent optimiser la fertilisation des cultures. L'utilisation simultanée de la RDT et des logiciels de fertilisation et de simulation (*PLANTEC* et *LessN*) permettra au pépiniériste de produire des plants de qualité tout en minimisant l'impact environnemental des apports d'engrais. Ces nouvelles technologies sont maintenant à la portée du pépiniériste et sont facilement transposables dans la majorité des pépinières forestières. D'ailleurs, ces techniques ont montré leur efficacité dans l'amélioration de la qualité des plants, de leur croissance et de leur taux de survie. Elles sont utilisées dans le cadre de projets de modernisation des pépinières et de transfert de technologie dans plusieurs pays.

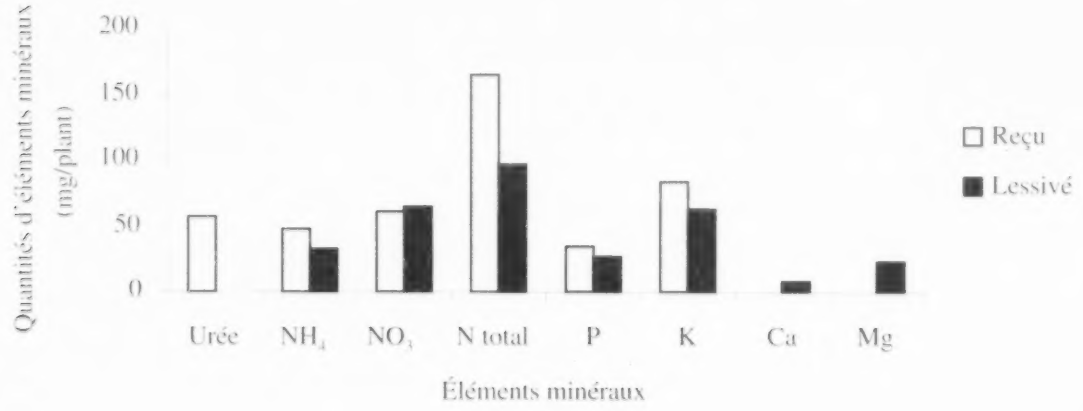

Figure 3. Quantités d'éléments minéraux (mg/plant) reçues et lessivées sous la culture extérieure d'épinette blanche 2 + 0.

Références bibliographiques

BANTON, O. et M. LAROCQUE, 2002. LessN *3.0 – Manuel d'utilisation. Logiciel de simulation du devenir de l'azote (N) et des pesticides appliqués dans les pépinières forestières.* INRS-Eau, Québec, Canada, 73 p.

GAGNON, J. et D. GIRARD, 2001. *Bilan des pertes saisonnières de nitrates (NO_3^-) et d'eau sous une culture d'épinette blanche 2 + 0 produite dans le récipient* 25-350A. Ministère des Ressources naturelles[1], Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 466, 36 p.

GIRARD, D., J. GAGNON et C.-G. LANGLOIS, 2001. PLANTEC : *Un logiciel pour gérer la fertilisation des plants forestiers en pépinière.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 111, 8 p.

JUNTUNEN, M.L. et R. RIKALA, 2001. *Fertilization practice in Finnish forest nurseries from the standpoint of environmental impact.* New For. 21 : 141-158.

LAMHAMEDI, M.S., H. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et I. AUGER, 2002a. *Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire* (Picea mariana) *(1 + 0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière.* Can. J. For. Res. 33 : 279-291.

LAMHAMEDI, M.S., M. RENAUD et H. MARGOLIS, 2002b. *La réflectométrie dans le domaine temporel : une technique d'optimisation de l'irrigation et de réduction du lessivage en pépinières forestières au Quebec.* Cahiers Agricultures 11: 275-283.

LAMHAMEDI, M.S., G. LAMBANY, H. MARGOLIS, M. RENAUD et L. VEILLEUX, 2001. *Growth, physiology and leachate losses in* Picea glauca *seedlings (1 + 0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes.* Can. J. For. Res. 31 : 1968-1980.

LAMHAMEDI, M.S., Y. AMMARI, B. FECTEAU, J. A. FORTIN et H. MARGOLIS, 2000. *Problématique des pépinières forestières en Afrique du nord et stratégies d'orientation.* Cahiers Agricultures 9 : 369-380.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1993. *A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries. Dans :* N.J. Barrow, éd. Plant Nutrition-From Genetic Engineering to Field Practice. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas, p. 303-306.

LAROCQUE, M., O. BANTON, J. GAGNON et C. CAMIRE, 2002. *Using models to manage soil inorganic nitrogen in forest tree nurseries.* Soil Sci. Soc. Am. J. 66 : 602-612.

LASCOUX, D.M., A. KREMER et I. DORMLING, 1993. *Growth and phenology of 1-year-old maritime pine* (Pinus pinaster) *seedlings under continuous light : implications for early selection.* Can. J. For. Res. 23 : 1325-1336.

MARGOLIS, H.A. et D.G. BRAND, 1990. *An ecophysiological basis for understanding plantation establishment.* Can. J. For. Res. 20 : 375-390.

PEPPER I.L., C.P. GERBA, M.L. BRUSSEAU et J.W. BRENDECKE, 1996. *Pollution Science.* Academic Press, San Diego, 397 p.

STOWE, D.C., M.S. LAMHAMEDI et H.A. MARGOLIS, 2001. *Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized* Picea glauca *seedlings in response to controlled irrigation regimes.* Can. J. For. Res. 31 : 2200-2212.

[1] Depuis le 29 avril 2003, le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) est désigné sous la nouvelle appellation de ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP).

2003-3114

ISBN 2-550-41831-X
Dépôt légal 2003
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
© 2003 Gouvernement du Québec

Ressources naturelles, Faune et Parcs
Québec

New Forest Seedling Production Technologies in Quebec and their Integration in Reforestation Programs in Developing Countries

Research Note
Tabled at the XII World Forestry Congress – Québec, Canada 2003,
by the *Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec*

September 2003

Direction de la recherche forestière (Forest Research Branch)

Ressources naturelles, Faune et Parcs
Québec

New Forest Seedling Production Technologies in Quebec and their Integration in Reforestation Programs in Developing Countries

by

Mohammed S. Lamhamedi[1] and Jean Gagnon[2]

Research Note
Tabled at the XII World Forestry Congress – Québec, Canada 2003,
by the *Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec*

Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP)
Direction de la recherche forestière (Forest Research Branch)
2700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
Canada

Telephone: (418) 643-7994
Fax: (418) 643-2165

mohammed.lamhamedi@mrnfp.gouv.qc.ca
jean.gagnon@mrnfp.gouv.qc.ca

www.forestrycongress.gouv.qc.ca
www.mrnfp.gouv.qc.ca

---

[1] Research Scientist, Forest Engineer, Ph. D.
[2] Research Scientist, Forest Engineer, M. Sc.

Abstract

Reforestation is among the strategies being adopted to reduce pressure on natural forests while meeting the needs for timber products and combating soil erosion and desertification. The use of quality forest tree seedlings results in better survival, establishment and growth and effectively guarantees more successful forestry plantations. To produce quality seedlings, forest tree nursery irrigation and fertilization management must be optimised. These cultural techniques use a high volume of water and therefore promote the leaching of mineral nutrients, which in turn affects the quality of both surface and groundwaters. The rational use of water and the preservation of water quality have become global issues for socio-economic development. New technologies have been developed for crop irrigation and fertilization to ensure that quality nursery seedlings are produced while minimizing the environmental impact of fertilization.

This article presents the most recent technological breakthroughs, which are not only unique in the world, but can also be easily incorporated into forest nursery practice. They are, notably: time domain reflectometery (TDR), which is used to control and optimize irrigation; *PLANTEC* fertilization software, and LessN software, a tool which simulates mineralization of the organic matter and leaching of nitrates and pesticides. These technologies have been integrated at varying degrees in several countries (China, Tunisia, Morocco, France, Nicaragua, Guatemala and Bolivia) to help reduce water use and protect water quality during seedling production. The use of quality seedlings has significantly improved survival rates on reforestation sites.

Key words: nursery, optimization, irrigation, fertilization, leaching, mineralization, software, *PLANTEC*, *LessN*, reforestation

Introduction

The use of quality seedlings in reforestation programs has a major effect on forest plantation establishment, physiology, survival and growth (Margolis and Brand 1990). Optimum growth conditions trigger genetic expression in forest seedlings, which otherwise would not occur under natural conditions until they are older (Lascoux et al. 1993). In this regard, irrigation and fertilization are among the cultural techniques that affect seedling quality, but are difficult to optimize in forest nursery practice. The unreasonable use of water, fertilizers and pesticides seriously endanger surface and groundwater quality (Pepper et al. 1996). However, the scarcity of water and the deterioration in the quality of water resources globally have become a major obstacle to food security and socio-economic development.

To preserve the quality of groundwater, regulations on potable water adopted in North America and Europe stipulate that nitrogen (N) concentrations, in the form of nitrates and nitrites, must not exceed 10 and 11.4 mg N/L, respectively. Although forestry and horticultural nurseries occupy a much smaller area than that used for agriculture, the techniques used to manage irrigation and fertilization in nurseries remains very wasteful of water and promotes leaching of mineral nutrients, especially nitrates (Juntunen and Rikala 2001; Lamhamedi et al. 2001). Currently, leaching and contamination of the water table by NO_3^- are global problems (Pepper et al. 1996).

During recent years, an original computerized approach to mineral nutrition was developed in Quebec. It consists of fertilizing seedlings to meet their weekly nutritional needs (Langlois and Gagnon 1993; Girard et al. 2001). Furthermore, this approach facilitates nursery seedling production by meeting very strict morphological and physiological standards, while reducing the environmental impact of fertilization. Quebec nurserymen have been employing this approach operationally since 1992, through the use of *PLANTEC* software (Girard et al. 2001). Other software, *LessN*, was developed to simulate mineralization of organic matter, and leaching of N and pesticides under bareroot seedlings in a forest nursery (Banton and Larocque 2002; Larocque et al. 2002). Recently, a study (Lamhamedi et al. 2001) was done to adapt a practical soil-monitoring tool (*MP-917*), whose principle is based on the time domain reflectometery (TDR), for irrigation optimization and management in forest nurseries. This technique facilitates irrigation decision making while giving a precise estimate of the amount of substrate water that is available in the rhizosphere.

To ensure a production of forest seedlings that better protects the environment, it appears wise to manage irrigation and fertilization by managing the moisture content (%, v/v) and fertility of the substrate as well as the moisture and mineral requirements of seedlings, inputs of elemental N from soil organic matter mineralization, precipitation, environmental variables, and irrigation and fertilization systems. This type of optimization of crop production regimes requires the simultaneous use of the aforementioned technological breakthroughs. For reforestation programs in developing countries to benefit from these leading-edge technologies, the key is to introduce and adapt them progressively within the framework of modernization projects in forest

nurseries.

This study presents technological breakthroughs developed in Quebec. These technologies are now being used operationally in forest nurseries, and are helping nurserymen to optimize seedling irrigation and fertilization. They consist of: 1) using TDR to control and optimize seedling (1+0 and 2+0) irrigation while minimizing leaching, 2) managing forest seedling fertilization in relation to seedling nutritional requirements and growth stages using *PLANTEC* software, 3) linking the LessN software, a tool which simulates the mineralization of organic matter and leaching of N and pesticides, with the TDR and *PLANTEC* software and 4) adapting and applying these tools in modern forest tree nurseries in developing countries with the goal of producing quality seedlings for reforestation.

Materials and methods

Control and optimization of irrigation of (1 + 0) seedlings produced in forestry nurseries

Experiments were established under operational conditions in forest nurseries using the two species which are the most frequently planted in Quebec—black spruce (1 + 0) (*Picea mariana* [Mill] BSP) and white spruce (1 + 0) [*Picea glauca* (Moench.) Voss]. The seeds were sown into *IPL 25-350A* air-slit containers (25 cavities, 350 cm^3/ cavity), filled with a mixture of peat and vermiculite (3/1, v/v). For both species, an experimental design was established in the form of six completely randomized blocks under polyethylene tunnels. The effect of four irrigation regimes (15%, 30%, 45% and 60%; % cm^3 H_2O/cm^3 substrate) on seedling growth, gas exchange, root architecture and fertilizer leaching was studied. For each irrigation regime, which was continuously maintained during the entire season, 162 containers (27 containers/block/regime) were used for each of the six experimental blocks. Each irrigation regime was randomly distributed within each block.

Substrate moisture content was controlled by TDR through the use of the *MP-917* (ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, BC, Canada). The control and adjustment procedures for irrigating and fertilizing the substrate, and the insertion of probes in the containers are described by Lamhamedi et al. (2000, 2001, 2002a). These studies present the sampling methods, growth analysis, evaluation of gas exchange, root architecture and mineral nutrition.

Computerized management of irrigation and leaching for seedling nutrition

Computerized management of fertilization using the *PLANTEC* software (Girard et al. 2001) allows nurseries to model the seasonal growth of forestry seedlings, independent of the crop type (species, age, containerized or bareroot seedlings). It also permits the evaluation of the weekly mineral requirements (N, P, K) and the establishment of a specific fertilization schedule for each species. Once crop monitoring data (seedling

growth, mineral levels in the seedlings and substrates or soils) have been entered into *PLANTEC*, the software prepares curves for the seasonal development of three parameters: total seedling dry mass, tissue mineral concentration and substrate mineral concentration. The steps required to prepare a fertilization schedule are described in Langlois and Gagnon (1993) and Girard et al. (2001).

Evaluation of mineral nutrients leaching for 1 + 0 and 2 + 0 container-grown seedlings

For both the white spruce and black spruce (1 + 0) experiments grown under tunnel conditions (May to October) in *25-350A* containers, the leaching of mineral nutrients was measured by analysing the solution leached from the four irrigation regimes on each sampling date. A plastic collector container (CC) fitted with a bottle at the base was placed under each *25-350A* container to collect the leachate .

In the case of the 2+0 white spruce seedlings grown outdoors in *25-350A* containers, leaching was monitored continuously throughout the entire growing season (May to October) in an experimental design with four completely randomized blocks. In each block, five CC were installed to collect the leachate, for a total of 20 CC. Although rain gauges measured water inputs (precipitation, irrigation), the seasonal evolution of the substrate moisture content (%, v/v) was measured using the *MP-917*. Environmental variables were recorded by a meteorological station equipped with a data acquisition system.

Use of the LessN software to simulate the mineralization of the organic matter and the leaching of nitrogen under bareroot seedlings

The *LessN* software was used to quantify mineral N (N_{min}) inputs resulting from the mineralization of the soil organic matter and to simulate nitrate (NO_3) leaching under bareroot seedlings. An interface was developed between the *LessN* simulation tool and the *PLANTEC* fertilization software that permits nurserymen manage nitrogen fertilization of bareroot seedlings by taking into account the N_{min} inputs originating from the mineralization of organic nitrogen. A total of 19 lysimeter plates were set up in the nursery to measure the quantities of nitrogen and other minerals leached beneath the bareroot seedlings.

Results and discussion

Control and optimization of irrigation in relation to seedling quality

Throughout the growing season, TDR was used to maintain the four substrate moisture regimes (%, v/v) in the root zones of white spruce and black spruce (1 + 0) with a standard error that rarely exceeded 2% (Fig. 1). By modifying the TDR probe length, the number of plugs sampled can be adjusted for all types of containers used in forest tree nurseries all over the world. The simplicity and instantaneous character of TDR in

determining substrate moisture levels and irrigation decision-making has resulted in it becoming a commonly used technique in several forestry and horticultural nurseries (Lamhamedi et al. 2002b).

During the first growing season, the maintenance of the four target irrigation regimes had a significant effect on standard growth variables for black spruce ($P = 0.0261$ to $P < 0.0001$) and white spruce ($P < 0.0001$). The irrigation regime also significantly affected the mineral concentrations and nutrient contents of seedlings, as well as leaching, root architecture and gas exchange. These results corroborate those of several other studies (Lamhamedi et al. 2001; Stowe et al. 2001), who showed that reducing irrigation improves seedling growth and physiology.

The cumulative quantities of water used to maintain the 15, 30, 45 and 60% (v/v) irrigation regimes during the growing season for black spruce (1 + 0) seedlings attained 60, 69, 95 and 253 mm, respectively. Furthermore, comparisons among irrigation regimes reveal that black spruce (1 + 0) seedlings can be grown under a 15% irrigation regime without affecting their morphological and physiological attributes.

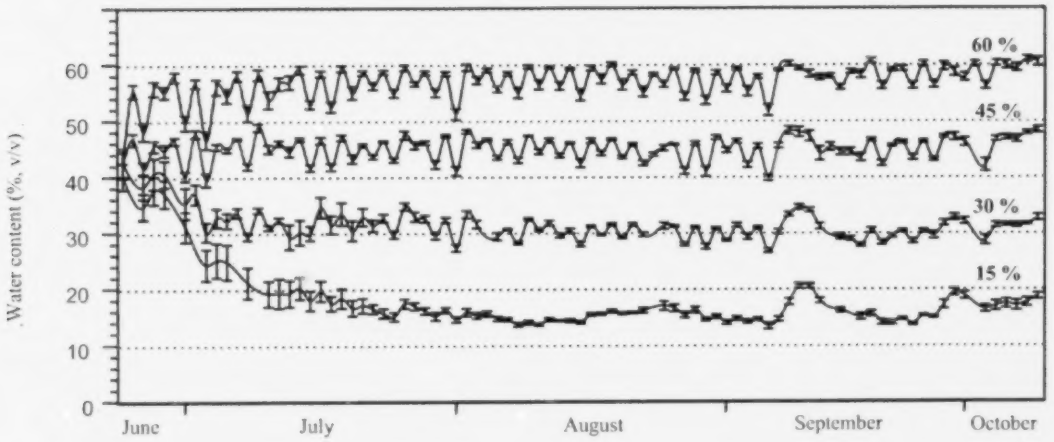

Figure 1. Example of very accurate control of the four moisture contents (%, v/v) in the substrate, using the TDR.

Computerized management of seedling fertilization in a forest nursery

The use of *PLANTEC* software, shows that the computerized mineral nutrition approach results in better management and optimization of fertilization in relation to the weekly nutritional needs of the seedlings and their respective growth phases. This software can simultaneously manage up to 500 lots and 100 fertilization schedules. *PLANTEC* can also monitor meteorological data, irrigation and pesticide applications, as well as manage nursery inputs. In relation to the available computerized tools, *PLANTEC* is the most complete because it takes several aspects of fertilization into account.

Evaluation of mineral nutrients leaching under (1 + 0) and (2 + 0) container-grown seedlings

Leaching of the soil solution under tunnel-grown (1 + 0) black spruce and white spruce seedlings can be expressed as an exponential function of the four irrigation regimes that were studied [$L = 0.1544e^{7.103x}$, $R^2 = 0.67$ where L = quantity of leachate in mL/plug and x = irrigation regime]. The 60% irrigation regime resulted heavy leaching of mineral nutrients from the *25-350A* containers.

For the (2 + 0) white spruce seedlings grown outdoors in the *25-350A* containers, water inputs totalled 872 mm, of which 374 mm were from rain (Fig. 2). The 872 mm of water is equivalent to an input of 114.7 L per container, whereas water losses amounted to 47 L/container, or 41% of the water inputs.

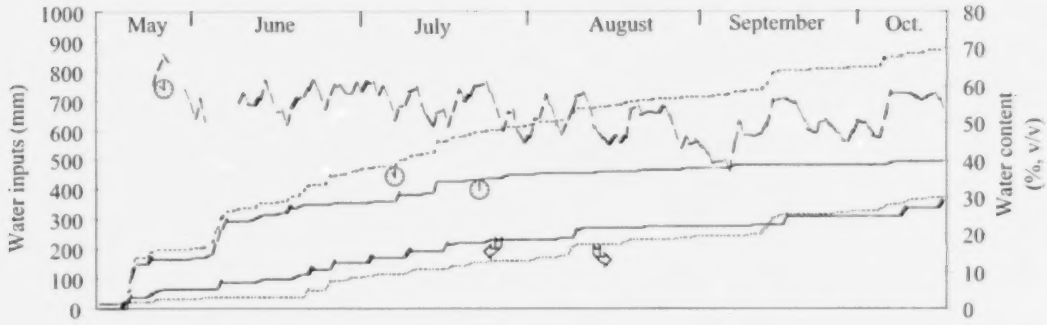

Figure 2. Seasonal evolution of: ① substrate moisture content (%, v/v), ② cumulative water inputs, ③ cumulative irrigation, ④ cumulative water losses, and ⑤ cumulative rainfall.

This water loss is in the same order of magnitude that obtained for a similar crop (51 L/container) by Gagnon and Girard (2001). Continuous monitoring of rhizosphere moisture content showed a variation from 37% to 69%, with a seasonal mean of 53% (v/v). Nurseryman should manage irrigation of containerized (2 + 0) seedlings to maintain the rhizosphere moisture content in the 35–40% (v/v) range, and to ensure that it never exceeds 50%.

The seasonal water loss (47 L/container) was accompanied by considerable leaching of anions (NO_3^-, $H_2PO_4^-$) and cations (NH_4^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}). Results showed that the NO_3^- ion is not the only mineral nutrient, nor the only source of nitrogen to have been leached during the growing season (Fig. 3). Of the 311 kg N/ha that the seedlings received between May 19 and October 18, 183 kg N/ha (59%) were leached. The lost nitrogen was 2/3 nitrate and 1/3 ammonium. To reduce losses, it is essential to maintain mineral nitrogen levels in the substrate (N_{min}) between 200 and 250 mg/kg (ppm) during the seedlings' active growth phase and not to exceed 250 mg/kg. By limiting the leaching of NO_3^- and the accompanying cations, the risk of groundwater contamination can be

substantially reduced.

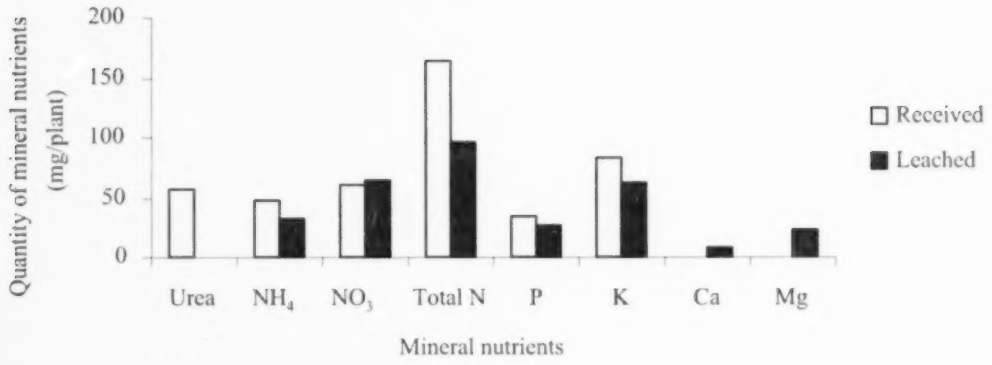

Figure 3. Quantities of mineral nutrients (mg/seedling) received and leached under the (2 + 0) white spruce seedlings grown outdoors.

Simulation of organic matter mineralization and of leaching under bareroot seedlings using LessN

To our knowledge, *LessN* is the only software designed to quantify the fate of nitrogen and pesticides used in forest nurseries. This software can also simulate the mineralization of soil organic matter (kg N/ha/year). With *LessN*, the nurseryman can determine the inputs of mineral nitrogen (N_{min}) that result from the mineralization of organic nitrogen, and deduct these N_{min} inputs from the planned nitrogen application rate. Therefore, *LessN* contributes to reducing, at source, the quantities of nitrates that are likely to be leached into the water table.

Simulations carried out by Larocque et al. (2002) with black spruce (2 + 0) seedlings revealed that under Quebec's climatic conditions, more than 90% of the annual leaching of nitrates occurs in the spring (snow melt) and autumn (rain). In fact, 75% of these losses occurr in the spring. Simulations with *LessN*, using data from these experiments, helped us quantify the mineralization of the organic matter in forest nurseries and to show that it varied between 50 and 80 kg N/ha/year.

Integration of new forest tree seedling production approaches in reforestation programs of other countries

Implementing and progressively integrating these technologies in reforestation programs of several countries [Tunisia, Morocco and Nicaragua (Lamhamedi et al. 2000), China (Langlois C.G., pers. comm.), France, Bolivia and Guatemala] was done within the framework of cooperative projects in networks or forest nursery modernization projects of. Several adjustments were done with respect to nursery management, especially the computerization of nurseries, choice of containers, composting

silvicultural waste and mycorrhization (Lamhamedi et al. 2000). These new techniques significantly improved seedling quality and survival rates.

Conclusion

The use of TDR in forest nurseries permits the management of irrigation in relation to seedling growth needs. Using the *PLANTEC* fertilization software and the *LessN* mineralization and leaching simulation software developed in Quebec, permits nurserymen to optimize fertilization of forest tree seedlings. The combined use of TDR and these software packages assists nurserymen in producing quality seedlings, while minimizing the environmental impact of fertilizer inputs. These new technologies are now available, and are easily applicable to most forest nurseries. Also, these techniques proved their efficiency in improving seedling survival rate, quality and growth. They are being used within the framework of nursery modernization projects and technology transfer in several countries.

References

Banton, O. and M. Larocque, 2002. LessN 3.0 – Manuel d'utilisation. Logiciel de simulation du devenir de l'azote (N) et des pesticides appliqués dans les pépinières forestières. INRS-Eau, Québec, Canada, 73 p.

Gagnon, J. and D. Girard, 2001. Bilan des pertes saisonnières de nitrates (NO_3^-) et d'eau sous une culture d'épinette blanche 2 + 0 produite dans le récipient *25-350A*. Ministère des Ressources naturelles[3], Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 466, 36 p.

Girard, D., J. Gagnon and C.-G. Langlois, 2001. *PLANTEC :* Un logiciel pour gérer la fertilisation des plants forestiers en pépinière. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 111, 8 p.

Juntunen, M.L. and R. Rikala, 2001. Fertilization practice in Finnish forest nurseries from the standpoint of environmental impact. New For. 21 : 141-158.

Lamhamedi, M.S., H. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux and I. Auger, 2002a. Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (*Picea mariana)* (1 + 0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière. Can. J. For. Res. 33 : 279-291.

Lamhamedi, M.S., M. Renaud and H. Margolis, 2002b. La réflectométrie dans le domaine temporel : une technique d'optimisation de l'irrigation et de réduction du lessivage en pépinières forestières au Québec. Cahiers Agricultures 11: 275-283.

Lamhamedi, M.S., G. Lambany, H. Margolis, M. Renaud and L. Veilleux, 2001. Growth, physiology and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1 + 0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. Can. J. For. Res. 31 : 1968-1980.

[3] On April 29, 2003, the *Ministère des Ressources naturelles du Québec* (MRN) became the *Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec* (MRNFP).

Lamhamedi, M.S., Y. Ammari, B. Fecteau, J. A. Fortin and H. Margolis, 2000. Problématique des pépinières forestières en Afrique du nord et stratégies d'orientation. Cahiers Agricultures 9 : 369-380.

Langlois, C.-G. and J. Gagnon, 1993. A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries. Dans : N. J. Barrow, éd. Plant Nutrition-From Genetic Engineering to Field Practice. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas, p. 303-306.

Larocque, M., O. Banton, J. Gagnon et C. Camiré, 2002. Using models to manage soil inorganic nitrogen in forest tree nurseries. Soil Sci. Soc. Am. J. 66 : 602-612.

Lascoux, D.M., A. Kremer and I. Dormling, 1993. Growth and phenology of 1-year-old maritime pine (*Pinus pinaster*) seedlings under continuous light : implications for early selection. Can. J. For. Res. 23 : 1325-1336.

Margolis, H.A. and D.G. Brand, 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. Can. J. For. Res. 20 : 375-390.

Pepper I.L., C.P. Gerba, M.L. Brusseau and J.W. Brendecke, 1996. Pollution Science. Academic Press, San Diego, 397 p.

Stowe, D.C., M.S. Lamhamedi and H.A. Margolis, 2001. Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized *Picea glauca* seedlings in response to controlled irrigation regimes. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212.